Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 4, 2023. (63-76)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Manufacturing Engineering of Iran

Investigating Fracture Mechanism in Single Point Incremental Forming of AA5052 Aluminum Alloy using Bao-Wierzbicki Damage Model

Research Article

Ali Zahedi Dizajyekan[1]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81834.1180

1. Introduction

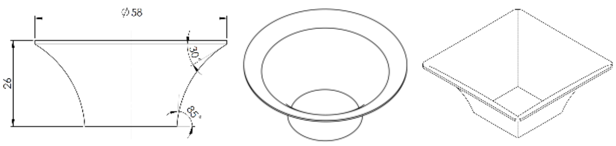
The incremental forming of sheet metal using CNC machines has grown significantly in the last decade, and with the clarification of different aspects of this process, it has attracted more attention from various industries of medical, automotive, and aerospace fields. The considerable flexibility of the process in the production of complex geometries and higher formability of sheets through the process have made it more interesting among researchers. On the concept of incremental forming, different types of the process were developed. Meanwhile, the most common and flexible form of the process is Single Point Incremental Forming (SPIF). The deformation mechanisms in this process are different compared to the similar processes such as deep drawing and spinning. Revealing deformation mechanisms through the forming process and exploring the reasons behind the increased formability attracted many efforts to this field.

The aim of this study was to investigate the formability of aluminum alloy 5052 sheet in SPIF process using the maximum possible forming depth which is called fracture height. To do so, a series of experiments were conducted to evaluate the fracture height of two different geometries. Moreover, in line with the laboratories efforts, numerical simulations of the process were performed in ABAQUS finite element environment. To predict the fracture initiation, the well-known Bao-Wierzbicki damage criterion was developed and the code was introduced to using VUMAT subroutine.

2. Experiments

In order to determine the elastic and plastic properties of aluminum sheet as well as to calibrate the damage criterion, uniaxial tensile tests were used in three directions of rolling, 45 degrees with rolling and perpendicular to rolling direction. The Swift hardening law were fitted through the acquired data points to calibrate the hardening model constants.

Simple geometries usually were selected to study the process. Two geometries of truncated cone and truncated pyramid with variable wall angle were opted. As Figure 1 shows, the wall angle at the beginning of the process is 30 degrees, and if the geometry is formed to the final height, this angle reaches 85 degrees.



(a) (b) (c)

Figure 1. Designed geometries (a) Generatix of the geometries, (b) Truncated Cone, (c) Truncated Pyramid

The tests were performed using a three-axis CNC machine and as shown in Figure 2, 100 mm in 100mm aluminum blanks were placed between two clamping plates and restricted to draw in. Considering 0.5mm vertical step size, Inventor software was used to export the tool path to form the geometries which directly introduced to the CNC machine. A hemispherical tool with 5mm radius formed the blanks.



Figure 2. SPIF experiments

3. Numerical analysis

ABAQUS Explicit solver was used for the numerical analysis of the process. In order to simplify and reduce the analysis time of the process, only three components of the sheet, the forming tool, and the back plate were modeled. Moreover, C3D8R element was used in the meshing the sheet as the only deformable body. Based on the sensitivity analysis of the mesh size, the size 0.5 was chosen for the elements in the forming area. The blank edges were constrained to prevent any movement and also the forming tool followed exactly the utilized tool path in the

*Manuscript received: April 8, 2023. Revised, June 7, 2023, Accepted, August 4, 2023.

1. Mechanical Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **Email**: azahedi@uma.ac.ir

experiments. Due to the large deformation in this process, ALE technique was used in sheet meshing. In order to reduce the computational cost, by keeping the ratio of kinetic energy to internal energy below 10%, the simulations were performed with time scaling of 40. The Hill'48 plasticity model incorporated into the B-W damage model and, the developed model was introduced to ABAQUS using VUMAT sub-routine. The modified swift hardening rule and the plasticity model are presented in Equation 1 and Equation 2, respectively.

$$\sigma = \begin{cases} k(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n \\ qk(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n + (1-q)\bar{\sigma}_{UTS} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{eq} = [F(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + G(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + H(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (2)$$

The element deletion technique is used in the numerical simulations. Accordingly, the damage value (D) is calculated through the process and, as D reaches one, the element will eliminate from the FE model. The formulation of the D and the fracture strain based on the B-W damage model are presented below:

$$D_c = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f(\eta)} \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_f = \frac{c}{3\eta} \quad (4)$$

4. Results and discussion

The maximum possible forming height is considered to evaluate the formability of sheets and, as presented in Figure 1, this parameter is directly related to the maximum forming wall angle. Laboratory tests showed that AA5052 aluminum sheet is not capable of forming up to the final height of 25 mm and will fracture sooner. Figure 3 shows the height of fracture corresponding to each geometry to make possible the comparison with the results of numerical simulations.

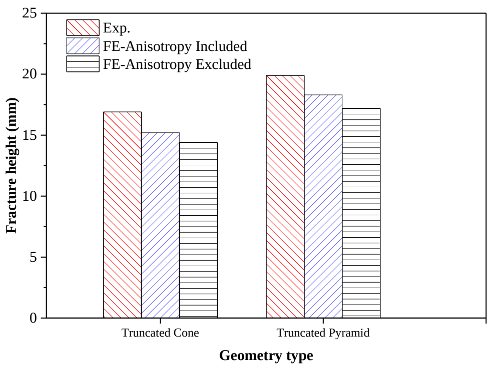


Figure 3. Comparison of fracture height in experimental tests with numerical simulation in two situations with and without consideration of sheet anisotropy

The results showed that the average forming height of truncated pyramid and truncated cone were 19.9 mm and 16.9 mm, respectively. On the other hand, using the numerical model, the fracture height was obtained in two cases: (a) by applying sheet anisotropy in the B-W damage model; (b) without applying anisotropy in the B-W damage model. In this way, in case (a), the fracture heights of two geometries, truncated pyramid and truncated cone, were predicted with 8% and 10% accuracy, respectively. In case (b) and assuming that the sheet is isotropic, the simulation of the process was carried out until failure. Considering this assumption, the yield model used for the sheet will be Von Mises. In this case, the prediction accuracy reduced to 15% and 14% for two geometries, truncated pyramid and truncated cone. According to these results it can be said that in the investigated geometries, considering the sheet anisotropy has improved the prediction accuracy by 4.5%.

Due to the increasing wall angle of the designed geometries, with the increase of the forming depth and advancement of the tool, the level of plastic strains in the sheet increases (Figure 4) and the sheet shows more deformation against the forming forces. Due to the direct relationship between damage size and plastic strains, the damage accumulated in the sheet elements gradually increases. This happens to all elements of the sheet but with different intensity. For example, according to Figure 4, three different elements at three different heights of the forming geometry were selected to show these changes. Figure 4 shows the changes in the plastic strain of the elements with the increase of the forming depth. As can be seen, the level of plastic strains increases step by step with the progress of the process.

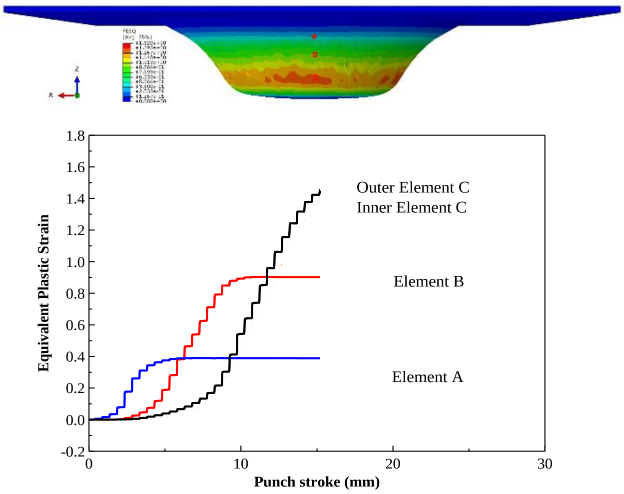


Figure 4. Variation of plastic strain in three different locations during the process until the damage initiation instance

5. Conclusion

The results showed that the B-W damage model has a good ability to predict failure in the SPIF process, so that the fracture height of the studied geometries predicted 9% lower than the experimental results. Moreover, without applying the anisotropy of the sheets and considering the Von-Mises yield criterion for the plasticity behavior of the sheet, the accuracy of predicting the results dropped by 5%. The analysis of stress and strain distribution in deformed geometries showed that sheet failure starts from the outer surface and then propagates to the inner layers.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

تحلیل مکانیزم شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیومی AA5052 با معیار آسیب بائو-ویرزبیکی*

مقاله پژوهشی

علی زاهدی دیزج یکان[(۱)]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81834.1180

چکیده *شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی یکی از روش‌های مورد توجه شکل‌دهی ورق است که اعمال موضعی نیروهای شکل‌دهی و عدم حضور قالب مادگی در آن، باعث افزایش حد شکل‌پذیری ورق و افزایش انعطاف‌پذیری این فرایند در تولید هندسه‌های پیچیده می‌شود. در پژوهش حاضر، از دیدگاه مکانیک آسیب، یکی از ویژگی‌های بارز این فرایند یعنی حدود شکل‌پذیری بر روی ورق آلومینیومی AA5052 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا مدل آسیب بائو- ویرزبیکی در قالب زیر برنامه VUMAT به نرم‌افزار آباکوس معرفی شد. ثابت‌های مدل آسیب، مدل سخت‌شوندگی و مدل تسلیم هیل۴۸ با استفاده از آزمایش‌های کشش تک‌محوری در سه راستای نورد، °۴۵ با راستای نورد و عمود بر راستای نورد برای ورق آلومینیومی کالیبره شد. به منظور بررسی شکل‌پذیری ورق، از هندسه‌های مخروط ناقص و هرم ناقص با زاویه دیواره‌های متغیر افزایشی استفاده شد و آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس انجام گردید. با استفاده از توزیع کرنش و تنش، پدیده شکست و نحوه شروع آن تشریح گردید. نتایج نشان می‌دهد که ورق فلزی قبل از این‌که به ارتفاع نهایی طراحی شده برای دو هندسه برسد، دچار شکست می‌شود به‌طوری که برای هندسه هرم ناقص و مخروط ناقص ارتفاع شکست به ترتیب برابر ۱۹/۹mm و ۱۶/۹mm می‌باشد. با توجه استخراج خواص ناهمسانگردی ورق و استفاده از آن در شبیه‌سازی فرایند، ارتفاع شکست نمونه‌ها با دقت میانگین ۹٪ پیش‌بینی گردید و نتایج نشان داد بدون در نظر گرفتن ناهمسانگردی ورق‌ها، دقت پیش‌بینی ارتفاع شکست ورق افت می‌کند. همچنین انطباق قابل قبولی در پیش‌بینی محل شروع شکست به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی شکل‌دهی تدریجی ورق، معیار آسیب، المان محدود، تحلیل تنش.

Investigation of Fracture Mechanism in Single Point Incremental Forming of AA5052 Aluminum Alloy Using the Bao-Wierzbicki Damage Model

Ali Zahedi Dizajyekan

Abstract *Incremental sheet metal forming is one of the promising sheet forming processes, in which local nature of the applied forming forces and independency of the process on the die, induces higher formability in the sheet and increases flexibility of the process in producing intricate geometries. In current study, from damage mechanics window, one of the prominent features of the process, i.e. forming limits of AA5052 sheets has been investigated. For this purpose, firstly, Bao-Wierzbicki damage model is coded and implemented into Abaqus finite element program via VUMAT subroutine. The constants of the damage model, hardening model and Hill48 yield model have been obtained utilizing the uniaxial tensile experiments in three directions of 0º, 45º and 90º with respect to rolling direction. To examine the formability, truncated cone and pyramid geometries with variable increasing wall angles have been considered and the experimental tests and simulation of the process were conducted. Using the stress and strain distribution, fracture phenomena and onset of fracture were described. The results show that the sheet metal fractures before it reaches the designed final height, so that for the geometries of truncated pyramid and truncated cone, the fracture height is obtained 19.9 mm and 16.9 mm, respectively. Considering the sheet anisotropy properties in the process simulation, the fracture height of specimens was predicted with an average accuracy of 9%, and the results reveal that with excluding the anisotropy properties of the sheets, the prediction accuracy decreases. Also, an acceptable agreement was obtained in predicting the fracture location.*

Key Words Incremental sheet forming, Damage model, Finite element, Stress analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۱۳ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی.

Email: azahedi@uma.ac.ir

مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از ماشین‌های کنترل عددی، در دهه اخیر رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است و با روشن شدن زوایای مختلف این فرایند بیشتر مورد توجه صنایع مختلف در حوزه‌های ساخت تجهیزات پزشکی، خودرو و هوافضا قرار گرفته است. انعطاف‌پذیری بالای فرایند در تولید هندسه‌های پیچیده و حذف زمان و هزینه‌های مربوط به ساخت قالب‌های مربوط، جذابیت این روش شکل‌دهی ورق را مخصوصا در تیراژ تولید دسته‌ای (batch production) محصولات ورق فلزی دو چندان کرده است. با توجه به کاربرد مورد نظر، در مواردی از سنبه‌ای با شکل عمومی در محفظه شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود که به شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای (Double Sided Incremental Forming) (DSIF) شناخته می‌شود. در این حالت انتظار توزیع یک‌نواخت‌تر ضخامت در دیواره‌های شکل هندسی مد نظر وجود دارد. با این حال شکل متداول و منعطف فرایند، شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق (Single Point Incremental Forming) (SPIF) است که بدون هیچ قالب نری می‌باشد و مسیر ابزار شکل‌دهی تعیین‌کننده شکل نهایی محصول است.

مکانیزم‌های تغییر شکل در این فرایند متفاوت با فرایندهای مشابه مانند کشش عمیق و یا چرخکاری است؛ این تفاوت‌ها از یک سو و بهبود شکل‌پذیری ورق فلزی از سویی دیگر توجه محققان زیادی را در سال‌های اخیر به این فرایند جلب کرده است. ایمنز و همکاران [1] در سال ۲۰۰۹ مکانیزم‌های تغییر شکل ورق در فرایند شکل‌دهی تدریجی را با استفاده از آزمایش‌های تجربی بررسی کردند. در این پژوهش، اعمال تدریجی نیروهای تغییر شکل و همچنین خمش موضعی ورق حول ابزار شکل‌دهی، دو عامل اصلی در افزایش شکل‌پذیری معرفی شده است. سیلوا و همکاران [2] در سال ۲۰۱۱ در طی آزمایش‌های تجربی نشان دادند که در شعاع‌های پایین ابزار، قبل از شروع شکست گلویی شدن اتفاق نمی‌افتد و همین عامل را به همراه نرخ رشد پایین آسیب انباشته دلیلی بر زیاد بودن شکل‌پذیری فرایند SPIF در شعاع‌های پایین دانستند؛ ماهوترا و همکاران [3] در سال ۲۰۱۲ به بررسی مکانیک شکست در فرایند SPIF با استفاده از مدل شکست نرم ژو (Xue) پرداختند. با استفاده از این مدل، گلویی شدن قبل از وقوع شکست در ورق آلومینیومی AA1050 در شعاع های متداول ابزار بررسی شده است. غمدی (Ghamdi) و حسین [4] نشان دادند که با کاهش اندازه شعاع ابزار تا مقدار آستانه، فشار هیدرواستاتیک در زیر ابزار افزایش می‌یابد و رشد آسیب کمتر می‌شود. با کاهش اندازه شعاع ابزار از مقدار آستانه، با وجود افزایش فشار هیدرواستاتیک، نرخ تجمع آسیب بیشتر شده و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. میرنیا و شمساری [5] رشد آسیب و شروع شکست در شکل‌دهی ورق‌های AA6061-T6 در فرایند شکل‌دهی تدریجی را با استفاده از مدل آسیب MMC3 بررسی کردند. در تحلیل عددی با در نظر داشتن تغییرات تنش سه محوری و پارامتر لود، تغییر شکل غیر خطی و افزایش شکل‌پذیری در این فرایند تشریح شده است.

محققان از مدل‌های مختلف رفتاری ماده در نواحی تسلیم و شکست استفاده کرده‌اند تا وضعیت شکل‌دهی و افزایش شکل‌پذیری در این فرایند را پیش‌بینی و تحلیل نمایند. ناپایداری و بروز شکست در این فرایند با استفاده از کمیت‌های تنش هیدرواستاتیک، پارامتر لود و کرنش شکست، پیش‌بینی و تحلیل شده است. طبق پژوهش زاهدی و همکاران [6] در سال ۲۰۱۵ شعاع ابزار شکل‌دهی و اندازه گام عمودی در فرایند SPIF دو پارامتر بسیار مهم در میزان شکل‌پذیری ورق‌های فلزی است که در محدوده کاری خود، هر قدر پایین‌تر باشند وضعیت شکل‌پذیری ورق بهبود خواهد یافت. گاتئا و همکاران [7] در سال ۲۰۱۷ با در نظر گرفتن اثر تنش‌های برشی ضخامتی و اصلاح مدل آسیب GTN، نشان دادند که رشد آسیب و شکل‌پذیری در فرایند SPIF علاوه بر وضعیت کرنش به وضعیت تنش‌ها نیز وابسته است و بدون در نظر گرفتن آن‌ها نمی‌توان پیش‌بینی قابل قبولی از شکل‌دهی در این فرایند به دست آورد. در مدل آسیب مناسب این فرایند می‌باید اثر تجمعی کرنش پلاستیک در نظر گرفته شود. گزمان و همکاران [8] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از مدل آسیب GTN شکل‌دهی تدریجی ورق DC01 را مورد بررسی عددی قرار دادند، علی رغم حجم قابل توجه آزمایش‌های تجربی برای کالیبره کردن مدل آسیب، تطابق قابل قبولی بین ارتفاع شکست مجاز نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده گزارش نشده است. کومار و همکاران [9] در سال ۲۰۲۲ از مدل اصلاح شده لمتر برای پیش‌بینی وضعیت شکل‌دهی ورق AA1050 در این فرایند استفاده کردند. ایشان حداکثر زاویه شکل‌دهی در

هندسه مخروط ناقص را با دقت قابل قبولی در مدل عددی به‌دست آوردند. اخیرا پنگ و کیو [10] در سال ۲۰۲۳ از آزمایش‌های تجربی دقیقی برای تبیین مکانیزم‌های تغییر شکل در هر دو نوع فرایند شکل‌دهی DSIF و SPIF استفاده کردند. همچنین آن‌ها با اصلاح مدل GTN و در نظر گرفتن ترم تنش برشی پیش‌بینی دقیق‌تری از حدود شکل‌دهی بر اساس شکست را در این فرایند ارائه کردند. با توجه به این‌که ناهمسانگردی ورق بر روی تنش‌های پسماند و برگشت فنری ورق مؤثر است نادیده گرفتن این خاصیت از ورق در شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی ورق می‌تواند منجر به بروز خطا در پیش‌بینی وضعیت نهایی شکل‌دهی شود. همچنین ناهمسانگردی ورق بر روی مقاومت ماده در برابر تغییر شکل و توزیع کرنش‌های ضخامتی مؤثر است و در فرایندهایی نظیر شکل‌دهی تدریجی ورق که توزیع ضخامت در طول دیواره هندسه شکل‌دهی یکسان نمی‌باشد می‌تواند در پیش‌بینی دقیق حداکثر ارتفاع شکل‌دهی و وقوع/عدم وقوع پدیده شکست ایفای نقش کند.

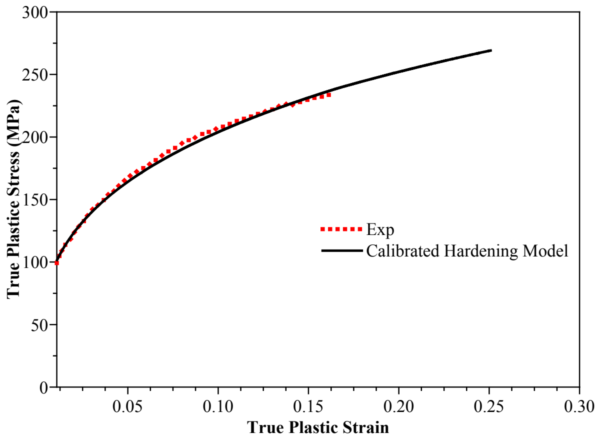
مرور پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد تحقیقات محدودی بر روی اثر ناهمسانگردی ورق فلزی بر روی شکل‌پذیری ورق در فرایند شکل‌دهی تدریجی انجام شده است. از این جهت، در این مطالعه سعی شده است دانش بیشتری در این خصوص حاصل شود. برای این منظور فرم اصلاح شده‌ای از معیار آسیب بائو-ویرزبیکی با در نظر گرفتن معیار تسلیم هیل ۴۸ ارائه شده است و مدل ماده به دست آمده از طریق زیر برنامه VUMAT به نرم‌افزار آباکوس معرفی شده است. با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوری و روش هیبرید تجربی-عددی برای کالیبراسیون ثابت‌های مدل ماده برای ورق آلومینیومی AA5052 استفاده شده است. در ادامه فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق مورد مطالعه به‌صورت دو هندسه متفاوت در محیط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. بیشترین ارتفاع شکست به عنوان مبنایی جهت ارزیابی شکل‌پذیری ورق در این فرایند گزارش شده و نتایج حاصل بررسی شده است.

آزمون‌های تجربی

آزمون‌های تعیین خواص مواد

این پژوهش بر روی ورق آلومینیومی AA5052 با ضخامت ۱mm انجام شده است. به منظور تعیین خواص الاستیک و پلاستیک ورق آلومینیومی و همچنین کالیبره کردن معیار آسیب از آزمون‌های کشش تک‌محوری در سه راستای نورد، ۴۵ درجه با نورد و عمود بر نورد استفاده شده است.

آزمایش‌های کشش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM E08-04 و با طول گیج 50mm انجام شدند. هر آزمون کشش سه مرتبه تکرار گردید و با توجه به نزدیک بودن داده‌های هر سه آزمایش، میانگینی از آن‌ها جهت استخراج خواص مکانیک مورد نظر استفاده شد. همچنین جهت اندازه‌گیری ناهمسانگردی در هر راستا، طبق استاندارد ASTM E517 نرخ کرنش 0.5/min انتخاب شد و اندازه‌گیری‌ها در ازدیاد طول 20% صورت گرفت. با استفاده از داده‌های این آزمون‌ها، منحنی تنش-کرنش حقیقی ورق در راستای نورد طبق شکل (۱) به دست آمد. همچنین خواص مکانیکی ماده در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱ رفتار پلاستیک ورق AA5052 حاصل از کشش در راستای نورد (آزمایش تجربی و مدل سوئیفت کالیبره شده)

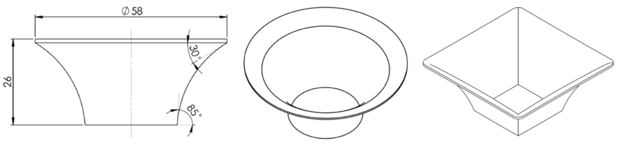
جدول ۱ خواص مکانیکی ورق آلومینیومی و ثابت‌های کالیبره شده آن

C	Q	$\overline{\sigma}_{UTS}$	k	ε_0	r	n
۰/۶۸۲	۰/۹۲	۲۰۰/۸	۴۱۹/۰	۰/۰۰۰۵	۰/۶۳۵	۰/۳۱۰

آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی ورق

فرایند شکل‌دهی تدریجی محدودیت چندانی از نظر قابلیت تولید هندسه‌های پیچیده ندارد؛ اما در پژوهش‌های انجام شده در این

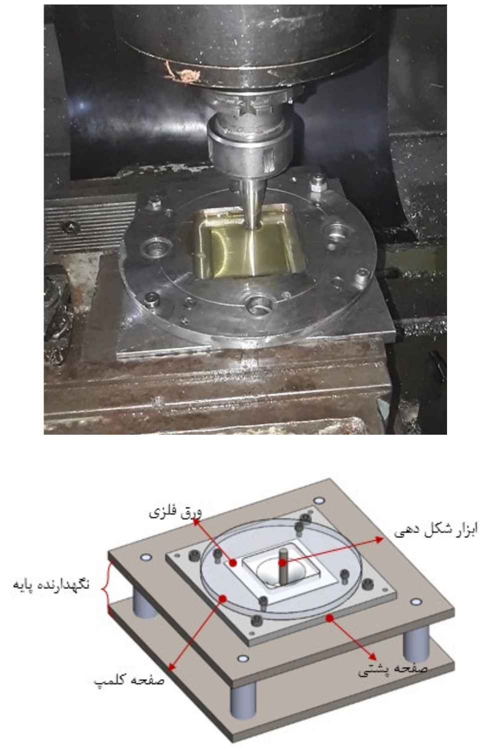
فرایند معمولا هندسه‌های ساده انتخاب می‌شود. در مطالعه حاضر نیز دو هندسه مخروط ناقص و هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، زاویه دیواره در ابتدای فرایند ۳۰ درجه می‌باشد و در صورتیکه هندسه قابل شکل‌دهی تا ارتفاع نهایی باشد، این زاویه به ۸۵ درجه می‌رسد.



(a) (b) (c)

شکل ۲ (a) نمای دید از روبه‌روی هندسه‌های استفاده شده (ابعاد به میلی‌متر است.) (b) هندسه مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر (c) هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر

مجموعه پایه، صفحه پشتی و صفحه کلمپ مناسب جهت شکل‌دهی تدریجی ورق‌ها طراحی و ساخته شد و با استفاده از ابزار شکل‌دهی سر کروی به شعاع ۵mm آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی با استفاده از ماشین‌ابزار CNC سه محوره انجام گرفت. اتصال صفحه کلمپ به صفحه پشتیبان از طریق ۴ پیچ آلن M8 صورت می‌گیرد و ورق بین این دو صفحه محکم می‌شود. همچنین اتصال صفحه پشتیبان به پایه، از طریق ۴ پیچ و مهره آلن M8 می‌باشد. مسیر حرکت ابزار با استفاده از نرم‌افزار Inventor برای گام عمودی ۰/۵ mm به‌دست آمده و وارد کنترلر ماشین‌ابزار شد. سرعت حرکت ابزار ۸۰۰mm/min بدون چرخش حول محور خود انتخاب گردید و جهت حذف اثرات نامطلوب اصطکاک و همچنین تشخیص به موقع شروع شکست، از روانکار مناسب (روغن هیدرولیک) استفاده گردید. لوح‌های مربعی در ابعاد ۱۰۰mm × ۱۰۰mm جهت آزمون‌های شکل‌دهی استفاده شد. در این فرایند، ورق‌ها بین صفحه پشتی و صفحه کلمپ کاملا ثابت می‌شوند و بر خلاف فرایند شکل‌دهی کشش عمیق ورق، به داخل حفره ماتریس جریان پیدا نمی‌کنند. شماتیکی از ستاپ آزمایشگاهی و فرایند در حال اجرا در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ اجرای آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق با دستگاه CNC

شبیه‌سازی عددی

به منظور تحلیل عددی فرایند از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. به منظور ساده‌سازی و کاهش زمان تحلیل فرایند، تنها سه جزو ورق، ابزار سر نیم کروی و صفحه پشتی مدل گردید و تنها ورق فلزی به صورت تغییر شکل‌پذیر تعریف شد. به این صورت از المان C3D8R در مش‌ریزی ورق ا ستفاده شد. بر ا ساس آنالیز حساسیت به اندازه مش، اندازه ۰/۵ برای المان‌ها در محدوده شکل‌دهی انتخاب شد. همچنین جهت پیاده‌سازی شرایط آزمایش در مدل سازی عددی، جهت ایفای نقش صفحه کلمپ، لبه‌های ورق کاملا مقید شدند؛ همچنین کد CNC ا ستفاده شده در آزمون‌های تجربی با استفاده از شرایط مرزی ابزار شکل‌دهی، عینا به نرم‌افزار آباکوس جهت حرکت آن معرفی شد. با توجه به تغییر شکل زیاد در این فرایند، از تکنیک ALE در مش‌زنی ورق استفاده گردید و همچنین جهت کاهش هزینه محاسباتی و با حفظ نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی زیر ۱۰٪، زمان اجرای فرایند ۴۰ برابر سریع‌تر از آزمون‌های تجربی لحاظ شده ا ست. با توجه به هدف پژوهش، مدل رفتاری ماده در قالب زیر برنامه VUMAT کدنویسی شده و به نرم‌افزار معرفی گردید. در ادامه، مختصری از روابط به کار گرفته شده در این کدنویسی ارائه شده است.

مدل رفتاری ماده

معیار تسلیم

در شبیه‌سازی‌های عددی برای بیان حد تسلیم ورق، از معیار تسلیم هیل ۴۸ طبق فرمولاسیون رابطه (۱) استفاده شد.

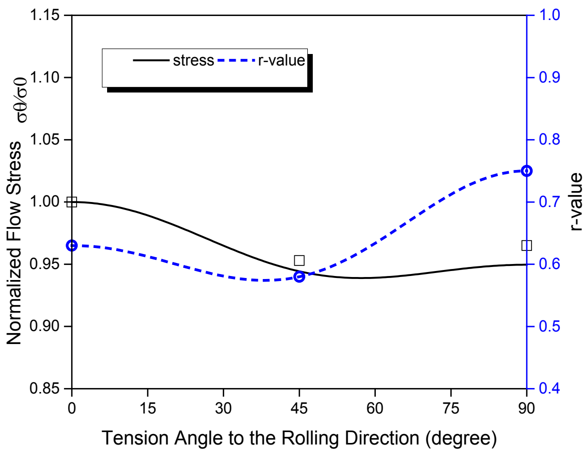
$$\sigma_{eq} = [F(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + G(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + H(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (۱)$$

در این رابطه σ_{ij} مؤلفه‌های تانسور تنش، σ_{eq} تنش مؤثر و ضرایب F و G و H و L و M و N مربوط به خواص ناهمسانگردی ورق می باشند؛ به‌طوری که اگر F= G= H= 1 و $L = M = N = \frac{3}{2}$ باشد ورق در سه راستای اشاره شده، خواص مکانیکی یکسانی از خود نشان داده است و می‌توان آن را همسانگرد در نظر گرفت. در غیر این صورت این ضرایب را با استفاده از مقدار r_θ (نسبت کرنش عرضی به کرنش ضخامت) برای راستای θ نسبت به جهت نورد می‌توان طبق روابط زیر به‌دست آورد.

$$G = \frac{F}{r_{90}}, H = \frac{F}{r_0}, F = \frac{r_0}{r_0+1}$$

$$L = M = \frac{3}{2}, N = \frac{(r_0+r_{90})(2r_{45}+1)}{2r_{90}(r_0+1)} \quad (۲)$$

جهت بیان ویژگی ناهمسانگردی ورق از رابطه $r = \frac{(r_0+2r_{45}+r_{90})}{4}$ که به عنوان ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق شناخته می‌شود استفاده شده است. ضرایب ناهمسانگردی و نسبت تنش در راستای کشش به تنش در راستای نورد (σ_θ/σ_0)، به دست آمده از آزمون‌های کشش تک‌محوری در سه راستای اشاره شده به‌صورت نموداری در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شکل سایر مقادیر مربوط به ناهمسانگردی ورق در جهات مختلف به‌صورت نمودار پیش‌بینی که توسط معیار هیل به‌دست می‌آید، نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، معیار تسلیم هیل پیش‌بینی نزدیکی از رفتار پلاستیک ناهمسانگردی ورق دارد. بیشترین تنش تسلیم ورق در راستای نورد به‌دست آمده است و طبق نمودار تغییرات، کمترین مقدار آن در نزدیکی زاویه ۴۵ درجه با راستای نورد رخ می‌دهد. منحنی تغییرات ضریب ناهمسانگردی نشان می‌دهد که ورق در حالتی که با راستای نورد زاویه ۹۰ درجه داشته باشد مقاومت بیشتری در برابر نازک‌شدگی از خود نشان می‌دهد. همچنین با توجه به مقدار کمتر از یک پارامتر ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق AA5052، می‌توان انتظار داشت که در حالت کلی این ورق در برابر نازک‌شدگی در فرایندهای شکل‌دهی مقاومت کمتری از خود نشان دهد و زودتر دچار نازک‌شدگی و در نهایت پارگی یا شکست گردد.



شکل ۴ خواص ناهمسانگردی پیش‌بینی شده و به‌دست آمده ورق AA5052 در سه زاویه نورد، ۴۵ درجه با نورد و عمود بر نورد

قانون سخت‌شوندگی

با توجه به این‌که در آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی ورق، کرنش‌های پلاستیک اعمال شده بر روی ورق، معمولا به بیش از کرنش گلویی در آزمایش تک‌محوری می‌رسد، به منظور مدل‌سازی دقیق رفتار ماده، مدل سخت‌شوندگی در نظر گرفته شده، باید رفتار پلاستیک ماده بعد از کرنش گلویی آزمون کشش تک‌محوری را نیز در بر بگیرد. برای این منظور و افزایش دقت پیش‌بینی کرنش‌های شکل‌دهی، با الهام از مرجع [11] معادله سویفت، طبق رابطه (۱-۴) برای کرنش‌های بالاتر از کرنش گلویی بازبینی گردید. در این اصلاح مدل، رفتار پلاستیک ماده در کرنش‌های بالاتر از کرنش گلویی به‌صورت ترکیب خطی از رفتار ماده همراه با کرنش سختی و بدون کرنش سختی به‌صورت رابطه (۳) ارائه شده است.

$$\sigma = \begin{cases} k(\varepsilon_0+\bar{\varepsilon}_p)^n \\ qk(\varepsilon_0+\bar{\varepsilon}_p)^n + (1-q)\bar{\sigma}_{UTS} \end{cases} \quad (۳)$$

در این رابطه n توان کرنش سختی ورق، ε_0 پیش کرنش، $\bar{\varepsilon}_p$ کرنش پلاستیک، k ضریب استحکام، $\bar{\sigma}_{UTS}$ تنش استحکام نهایی

و q عدد ثابت جهت کالیبره کردن مدل سخت شوندگی با نتایج تجربی است.

معیار آسیب

به منظور پیش‌بینی وقوع آسیب از معیار شناخته شده آسیب بائو–ویرزبیکی (B-W) استفاده شده است. محاسبه پارامتر متغیر آسیب در این معیار، از رابطه کلی (۴) تبعیت می‌کند:

$$D_c = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f(\eta)} \quad (۴)$$

در این رابطه η تنش سه‌محوری می‌با شد $(\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}})$ و D_c اندیکاتور آ سیب ا ست و در زیربرنامه می‌توان مقدار بحرانی آن را تعریف کرد؛ به این صورت که اگر آ سیب تجمعی در المانی به مقدار بحرانی بر سد، آن المان از مدل حذف گردد و موقعیت بروز آ سیب و شروع شک ست م شخص شود. مدل B-W بر ا ساس مطالعه دقیق رفتار شکست ۱۵ نمونه مختلف که شرایط بارگذاری متفاوتی را دا شتند بدست آمده ا ست، اغلب نمونه‌ها دارای شرایط تنش صفحه‌ای بودند که مناسب برای بررسی‌های مربوط به شکل‌دهی فلزات است. طبق معیار آسیب بائو ویرزبیکی، با تغییرات تنش‌های اعمالی به اغلب فلزات کرنش‌های شک ست متناظر متنا سب با آن‌ها تغییر نمی‌کند و به عبارتی، نمی‌توان گفت که در تمام شرایط بارگذاری، ارتباط یکسانی بین تغییرات کرنش شکست فلزات و تنش سه محوری وجود دارد. ایشان ارتباط بین کرنش شکست و تنش سه محوری را در قالب تابعی چندضابطه‌ای معرفی کردند. ضابطه‌ای از این معیار که می‌تواند در فرایندهای شکل‌دهی ورق کاربرد داشته باشد به‌صورت رابطه زیر ارائه شده است.

$$\bar{\varepsilon}_f = \frac{c}{3\eta} \quad (۵)$$

در این رابطه c ثابت ماده است و می‌توان با استفاده از داده‌های آزمون کشش تک‌محوری اندازه آن را به‌دست آورد. از طرفی برای به‌کارگیری این مدل آسیب برای ورق‌های ناهمسانگرد، باساک [12] با بررسی تغییر شکل المان‌ها از وضعیت اولیه تا وضعیت نهایی منجر به شکست، توانست رابطه (۶) را جهت تعیین مقدار این ثابت بر اساس ناهمسانگردی ورق به‌دست بیاورد:

$$c = \frac{2}{\sqrt{1+2r}} \ln\frac{t_0}{t_f} + 2\,n\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+2r}}\right) \quad (۶)$$

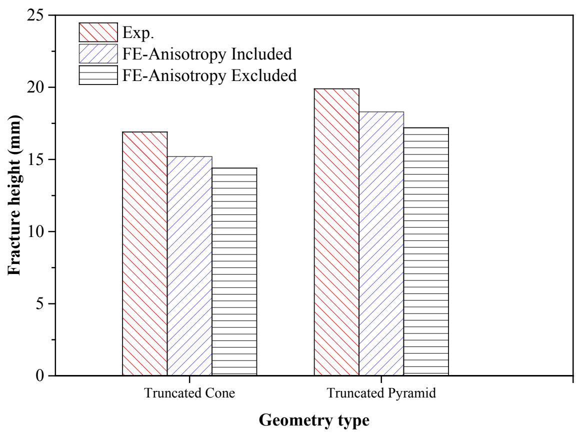
در این رابطه t_0 ضخامت اولیه ورق، t_f ضخامت ورق بعد از شک ست و n توان کرنش سختی آن ا ست. همان‌طور که دیده می‌شود، در مدل کلاسیک B-W اثر پارامتر لود بر روی کرنش شکست در نظر گرفته نشده است.

ارائه نتایج و بحث

پیش‌بینی عمق پارگی به‌دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود با مدل آ سیب، زمینه خوبی را برای تحلیل تغییر شکل و شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی مهیا می‌کند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در کنار تحلیل المان محدود فرایند در سه قسمت ارائه می‌گردد.

ارتفاع شکست

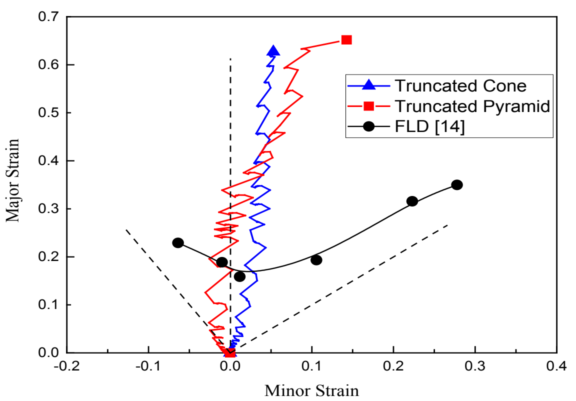
یکی از معیار های ارز یابی شکل پذیری ورق ها در فرایند شکل‌دهی تدریجی حداکثر ارتفاع قابل شکل‌دهی است؛ همان‌طور که در شکل (۲) ارائه شد، این پارامتر در ارتباط مستقیم با بیشترین زاویه دیواره قابل شکل‌دهی می‌باشد. آزمون های آز مایشگاهی نشان داد ند که ورق آلومینیومی AA5052 قابلیت شکل‌دهی تا ارتفاع نهایی ۲۵mm را ندارد و زودتر از آن دچار شکست می‌شود. به منظور مقایسه‌ای با نتایج حا صل از شبیه سازی‌های عددی، ارتفاع شکست مربوط به هر هندسه در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵ مقایسه ارتفاع شکست در آزمایش‌های تجربی با شبیه‌سازی عددی با معیار آسیب B-W در دو وضعیت با و بدون در نظر گرفتن ناهمسانگردی ورق

طبق نتایج به‌دست آمده، میانگین ارتفاع شکل‌دهی هندسه‌های

هرم ناقص و مخروط ناقص به ترتیب برابر ۱۹/۹mm و ۱۶/۹mm گردید. از طرفی با استفاده از مدل عددی ارتفاع مجاز شکل‌دهی در دو حالت به‌دست آمد: الف) با اعمال ناهمسانگردی ورق در مدل آسیب B-W، ب) بدون اعمال ناهمسانگردی در مدل آسیب B-W. به این صورت که در حالت (الف) ارتفاع شکست دو هندسه هرم ناقص و مخروط ناقص به ترتیب با دقت ۸٪ و ۱۰٪ پیش‌بینی گردید. در حالت (ب) و با فرض این‌که ورق همسانگرد است شبیه‌سازی فرایند تا بروز شکست اجرا گردید. در واقع با این فرض، مدل تسلیم استفاده شده برای ورق، ون میسز خواهد بود. در این حالت، دقت پیش‌بینی به مقادیر ۱۵٪ و ۱۴٪ برای دو هندسه هرم ناقص و مخروط ناقص تقلیل پیدا کرد. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که در هندسه‌های مورد بررسی، در نظر گرفتن ناهمسانگردی ورق دقت پیش‌بینی نتایج را ۴/۵ ٪ بهبود داده است. شایان ذکر است که در بررسی‌های انجام شده قبلی مانند پژوهش [5] و [12] دقت پیش‌بینی ارتفاع شکست برای هندسه‌های مختلف با اختلاف قابل توجهی نسبت به هم گزارش شده است. لذا دقت پیش‌بینی این مدل آسیب در پیش‌بینی وضعیت شکست را نمی توان بدون بررسی به هندسه‌های دیگر تعمیم داد. مطلب دیگری که در رابطه با نتایج حاصل می‌توان به آن اشاره کرد، تفاوت در ارتفاع شکست دو هندسه است. مسیر متفاوت ابزار در شکل‌دهی این دو هندسه، باعث شده است تا وضعیت کرنش اعمالی به ورق تابعی از مسیر ابزار و یا همان هندسه مدنظر باشد. در واقع همانند آزمایش‌های تعیین منحنی‌های FLD ورق که هندسه‌های مختلف، کرنش‌های حدی متفاوتی را به‌دست می‌دهند [13]؛ در این فرایند نیز هندسه‌های متفاوت می‌تواند مسیر های کرنش گوناگونی را باعث شود. لیکن استانداردی مانند استاندارد ISO 12004 مربوط به تعیین محدوده شکل‌پذیری ورق‌ها در فرایندهای شکل‌دهی سنتی، مختص این فرایند تدوین نشده است. برای بررسی بیشتر مسیر کرنش اولین المان محذوف دو هندسه در شکل (۶) ارائه شده است. همچنین همان‌طور که دیده می‌شود، منحنی حد شکل‌دهی ورق AA5052 با خواص مکانیکی مشابه به ورق مورد مطالعه در این پژوهش، از مرجع [14] به‌دست آمده و در این شکل آورده شده است. نتایج به‌دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که حدود شکل‌دهی در فرایند SPIF اختلاف قابل توجهی با فرایندهای شکل‌دهی سنتی برای ورق AA5052 دارند. ماهوترا [3] نشان داد که این اختلاف ناشی از فاصله قابل توجه گلویی نفوذی و گلویی موضعی در فرایند شکل‌دهی تدریجی است و البته مکانیزم‌های شکل‌دهی در این افزایش مؤثر هستند. نکته دیگر غیر خطی بودن مسیر کرنش در فرایند شکل‌دهی تدریجی است که به وضوح برای هر دو هندسه مورد مطالعه در این شکل دیده می‌شود. با توجه به موضعی بودن نیروهای اعمالی در این فرایند، برخلاف فرایندهای شکل‌دهی سنتی، کرنش‌های اعمالی به هر ناحیه از ورق شامل بارگذاری و باربرداری می‌شود و سیکلی غیرخطی از کرنش‌های اعمالی را باعث می‌شود. حالت کرنش در دو هندسه مورد بررسی مابین دو وضعیت کرنش صفحه‌ای و کشش دوبعدی قرار گرفته است و البته دو المان مورد بررسی در وضعیتی نزدیک به کرنش صفحه‌ای قرار دارند. با توجه به این‌که هندسه مخروط ناقص در کل فرایند شکل‌دهی تغییری نمی‌کند می‌توان انتظار داشت که وضعیت کرنش المان‌های این هندسه نزدیک به همین وضعیت کرنش صفحه‌ای باشند؛ ولی در خصوص هندسه هرم ناقص، با توجه به حضور گوشه، وضعیت کرنش در گوشه‌ها به حالت کشش دو محوره نزدیک‌تر خواهد بود. به عبارتی دیگر، تأثیر هندسه در حدود شکل‌دهی مربوط به ایجاد مسیر کرنش‌های مختلف در هندسه‌های متفاوت می‌شود.

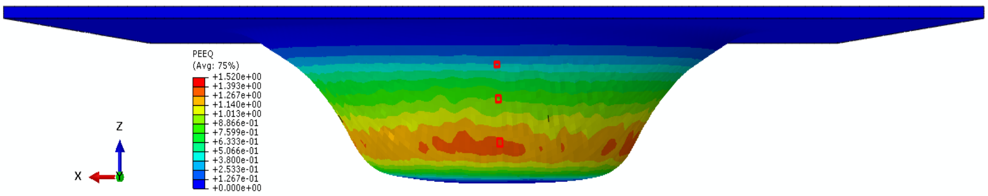


شکل ۶ مسیر کرنش المان بحرانی در مقایسه با حد شکل‌دهی ورق AA5052 به‌دست آمده از آزمون ناکاجیما

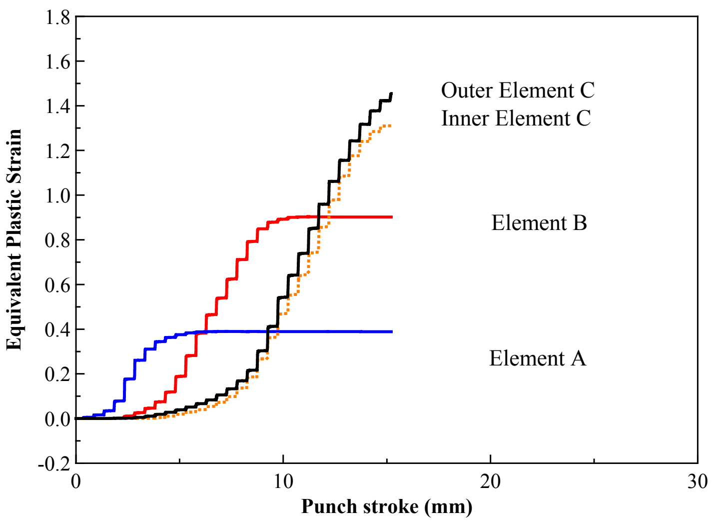
توزیع کرنش و تغییرات آن

با توجه به زاویه دیواره در حال افزایش هندسه‌های طراحی شده، با افزایش عمق شکل‌دهی و پیشروی ابزار، سطح

کرنش‌های پلا ستیک در ورق افزایش می‌یابد (شکل ۷) و ورق تغییر شکل بیشتری را از خود در برابر نیروهای شکل‌دهی نشان می‌دهد. با توجه به رابطه مســـتقیم اندازه آســـیب و کرنش‌های پلاستیک، به تدریج آسیب انباشته در المان‌های ورق نیز افزایش می‌یابد. این اتفاق برای تمام المان‌های ورق اما با شدت متفاوت رخ می‌دهد. برای مثال، طبق شکل (۷) سه المان مختلف در سه ارتفاع متفاوت از هندســه شــکل‌دهی جهت نمایش این تغییرات انتخاب گردید. شکل (۸) تغییرات کرنش پلاستیک المان‌ها را با افزایش عمق شکل‌دهی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود سطح کرنش‌های پلا ستیک با پیشروی فرایند به صورت پله‌ای افزایش می یابد. در واقع بعد از این‌که ابزار از محل مربوط به المان عبور می‌کند باعث افزایش یک سطح از کرنش پلاستیک در آن می‌شـــود. با فاصـــله گرفتن ابزار از محل المان، ســـطح کرنش‌های پلاســتیک در آن المان ثابت می‌ماند و شــرایط تغییر شکل اگر در محل آن المان (مانند المان B) شدید با شد باعث بروز گلویی موضعی می‌شود. با پیشروی فرایند و افزایش زاویه دیواره هندسه، ورق در معرض تغییر شکل بیشتری قرار می‌گیرد و افزایش اندازه کرنش‌های پلاســتیک در المان C در هر مرحله عبور ابزار، در مقایســـه با المان‌های قبل، بیشـــتر اســـت. تجمع کرنش‌های پلاستیک در نهایت منجر به بروز گلویی نفوذی و در نهایت شروع پارگی می شود. با توجه به بحرانی بودن المان C، تغییرات کرنش پلاســتیک در ســطح داخلی ورق در محل این المان نیز ترسـیم شـده اسـت. همان‌طور که در شـکل (۸) دیده می‌شـود، اندازه کرنش در ســطوح بیرونی و درونی متفاوت از یکدیگر اسـت و در سـطح بیرونی اندازه کرنش‌های پلاسـتیک بیشـــتری به‌دســـت می‌آید. این مطلب دلالت بر وجود گرادیان کرنش در راستای ضخامت در فرایند شکل‌دهی تدریجی است. این گرادیان با پیشرفت فرایند بیشتر می‌شود که نشان دهنده بالا بودن نرخ افزایش کرنش در سطح بیرونی ورق است.



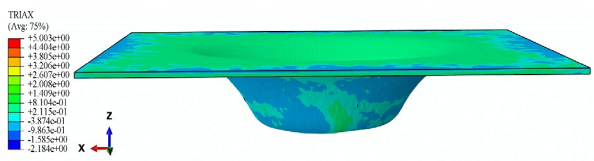
شکل ۷ توزیع کرنش پلاستیک در مخروط ناقص با دیواره متغیر در لحظه قبل از شروع آسیب



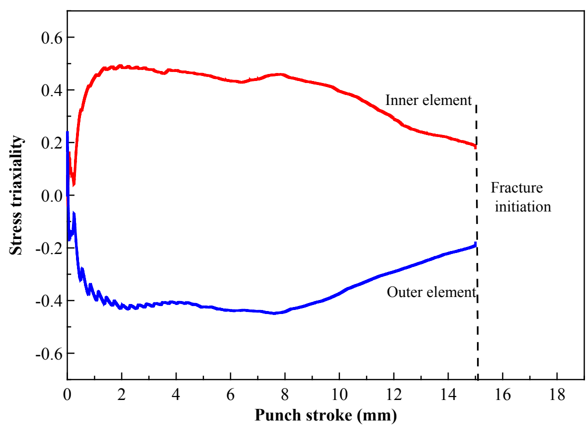
شکل ۸ تغییرات کرنش پلاستیک در سه موقعیت متفاوت در طول فرایند تا لحظه شروع آسیب

توزیع تنش

با توجه به ارتباط مابین تنش و کرنش شکست بررسی توزیع تنش در هندسه‌های تغییر شکل یافته حائز اهمیت است. شکل (۹) توزیع تنش سه‌محوری مخروط ناقص را در سطح بیرونی ورق نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تنش سه‌محوری در نقاط تماس ابزار با ورق قابل بررسی است و در سایر المان‌ها به دلیل وقوع برگشت فنری و یا حضور تنش‌های پسماند مفهوم فیزیکی خاصی را از روند تغییر شکل فرایند نمی‌رساند. از این روز مقادیر میانگین تنش سه‌محوری در موقعیت المان C در سطوح درونی و بیرونی به‌دست آمد و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر مثبت و منفی تنش سه‌محوری نشان دهنده گردایان تنش در راستای ضخامت ورق در این فرایند شکل‌دهی است که در نتیجه خمش موضعی ورق حول ابزار شکل‌دهی به وجود می‌آید. با نزدیک شدن ابزار به موضع المان مورد بررسی، سطح تنش‌ها بالاتر می‌رود و نوسانات تنش سه‌محوری نیز افزایش می‌یابد لیکن مقدار میانگین آن کاهش یافته و با توجه به رابطه عکس آن با کرنش شکست، شرایط شروع آسیب و حذف المان را پیش می‌آورد.



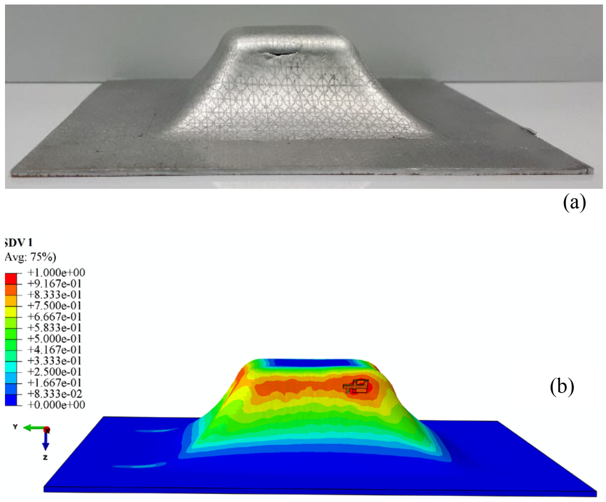
شکل ۹ توزیع تنش سه‌محوری در هندسه مخروط ناقص در یک فریم مانده با شروع شکست



شکل ۱۰ میانگین تنش سه‌محوری در سطح درونی و بیرونی المان C تا شروع شکست

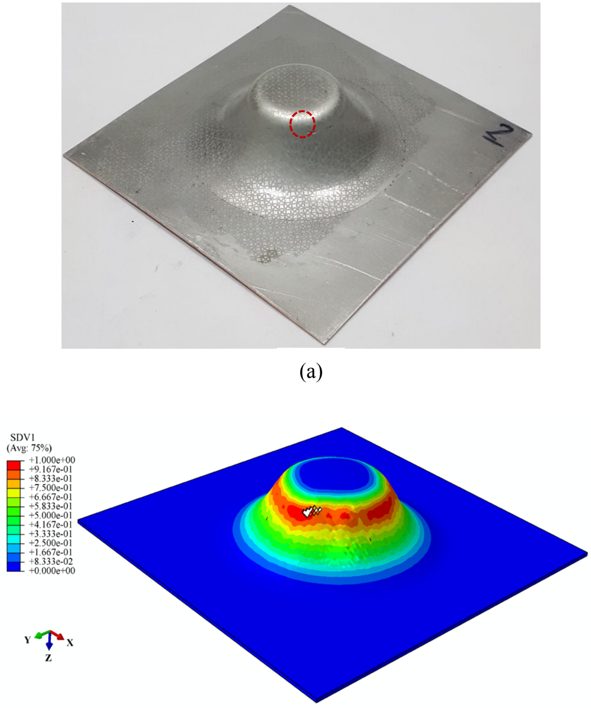
موقعیت شکست و وضعیت کرنش شکست

علاوه بر بررسی وضعیت تنش و کرنش، موقعیت شروع آسیب نیز دارای اهمیت می‌باشد. از این رو در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، موقعیت شکست در فرایند SPIF دو هندسه مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به ارتفاع شکست پیش‌بینی شده که در شکل (۵) ارائه شد، اختلاف ارتفاع پیش‌بینی را می‌توان تقریبا ضریبی از اندازه گام عمودی شکل‌دهی به حساب آورد. از این رو با این‌که ارتفاع شکل‌دهی کمتر از آزمایش‌های تجربی پیش‌بینی شده است، اما موقعیت شروع شکست را می‌توان گفت که با دقت خوبی به‌دست آمده است که در شکل (۱۱) برای هندسه هرم ناقص و در شکل (۱۲) برای مخروط ناقص نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مقایسه موقعیت شروع شکست (a) هرم ناقص حاصل از آزمایش‌های تجربی و (b) توزیع آسیب در هرم ناقص حاصل از شبیه‌سازی عددی

نتایج المان محدود نشـــان می‌دهد، توزیع کرنش‌ها بر روی دیواره هند سه‌ها، غیرمتقارن می‌با شد و کرنش در را ستای ابزار، افزایـ شی ا ست. با پیـ شرفت فرایند شکل‌دهی، کرنش‌ها افزایش می‌یابد، ولی با نزدیک شـــدن به کف قطعه (قســـمتی که تغییر شـــکل پیدا نمی‌کند) اندازه کرنش‌ها، به‌صـــورت کاهشـــی تغییر می‌کند. توزیع ضـــخامت بر روی هندســـه قطعه نیز غیرمتقارن اســـت. در صـــورتی که از این فرایند برای تولید قطعه اســـتفاده شـــود، باید این موارد غیریکنواختی در دیواره‌های قطعه باید در نظر گرفته شود.



(b)

شکل ۱۲ مقایسه موقعیت شروع شکست (a) مخروط ناقص حاصل از آزمایش‌های تجربی و (b) توزیع آسیب در مخروط ناقص حاصل از شبیه‌سازی عددی

همچنین شایان ذکر است که با توجه به ضخامت ورق و افزایش شعاع خم در لایه بیرونی، ناپایداری ورق از لایه بیرونی ورق شروع می‌شود و به سمت لایه داخلی حرکت می‌کند و در نهایت منجر به حذف المان و شروع ترک می‌شود. در واقع علاوه بر کرنش‌های صفحه‌ای، کرنش ضخامتی نیز در این فرایند نقش قابل توجهی در حد شکل‌دهی ورق ایفا می‌کند و به این دلیل مشاهده می‌شود که المان‌هایی که بیشترین سطح از کرنش‌های صفحه‌ای دارند المان آغازین برای شروع شکست نیستند و مجموع شرایط بارگذاری است که این مسئله را تعیین می‌کند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر شکل پذیری ورق آلومینیومی آلیاژی AA5052 در فرایند SPIF مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ارتفاع شکست ورق در طی این فرایند شکل‌دهی به عنوان معیاری از شکل‌پذیری ورق در نظر گرفته شد. به منظور بررسی بیشتر فرایند، از تحلیل عددی فرایند شکل‌دهی در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. در این راستا، از مدل آسیب بائو-ویرزبیکی، مدل سخت شوندگی سوئیفت و معیار تسلیم هیل ۴۸ جهت مدل‌سازی رفتار مکانیکی ماده استفاده شد. نتایج قابل توجهی از رفتار شکل‌پذیری ورق در این مطالعه به‌دست آمد که می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

۱. با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوری، ناهمسانگردی ورق ۰/۶۳۵ به‌دست آمد و نتایج نشان داد که معیار هیل ۴۸ پیش‌بینی خوبی از رفتار ناهمسانگردی ورق می‌تواند ارائه نماید.

۲. ارتفاع شکست آزمون‌های SPIF در هندسه‌های هرم و مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر به ترتیب ارتفاع 19/9mm و 16/9mm به‌دست آمد. حد ارتفاع متفاوت شکل‌دهی این دو هندسه، مربوط به هندسه متفاوت و در نتیجه بروز متفاوت تنش و کرنش است.

۳. نتایج نشان می‌دهد که مدل آسیب B-W توانایی خوبی در پیش‌بینی شکست در فرایند SPIF دارد به‌طوری که ارتفاع شکست هندسه‌های مورد مطالعه با اختلاف میانگین ۹٪ پایین‌تر از نتایج تجربی پیش‌بینی شده است.

۴. بدون اعمال ناهمسانگردی ورق‌ها و با در نظر گرفتن معیار تسلیم ون-میسز برای رفتار پلاستیسیته ورق، دقت پیش‌بینی نتایج ۵٪ افت داشته است.

۵. تحلیل توزیع تنش و کرنش در هندسه‌های تغییر شکل یافته نشان دهنده این است که شکست ورق از سطح بیرونی شروع می‌شود و سپس به سطوح درونی گسترش می‌یابد.

۶. نتایج عددی به‌دست آمده از مسیر کرنش المان‌های تغییر شکل یافته، دلالت بر بارگذاری غیرخطی در این فرایند دارد. همچنین مقایسه با نتایج چاپ شده، نشان دهنده بالاتر بودن کرنش های حدی در این فرایند نسبت به فرایند های شکل‌دهی سنتی است.

۷. محل شروع شکست در ارتفاعی بالاتر از کف هندسه تغییر شکل یافته و در محل تجمع آسیب رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی مدل عددی از این محل منطبق بر نتایج آزمایش‌های تجربی است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

ε_0	پیش کرنش
$\bar{\varepsilon}_f$	کرنش پلاستیک شکست
σ_{ij}	مولفه‌های تانسور تنش، MPa
σ_m	تنش میانگین، MPa
$\bar{\sigma}_{UTS}$	تنش استحکام نهایی، MPa
σ_{eq}	تنش معادل هیل۴۸، MPa
η	تنش سه محوری
C	ثابت ماده
D_c	اندیکاتور آسیب
F, G, H, L, M, N	ضرایب معیار تسلیم هیل۴۸
n	توان کرنش سختی
k	ضریب استحکام، MPa
Q	ثابت ماده
r	ناهمسانگردی صفحه‌ای
t_0	ضخامت اولیه، mm
t_f	ضخامت نهایی، mm

واژه نامه

ناهمسانگردی	Anisotropy
معیار آسیب	Fracture criterion
ازدیاد طول	Elongation
قانون سخت شوندگی	Hardening rule
تنش سه محوری	Stress triaxiality
کرنش صفحه ای	Plane strain
کشش دو بعدی	Equi-biaxial tension

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] W. C. Emmens and H. V. D. Boogaard, "An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 209, no. 8, pp. 3688-3695, 2009.

[2] M. B. Silva, P. S. Nielsen, N. Bay, and P. A. F. Martins, "Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 56, pp. 893-903, 2011.

[3] R. Malhotra, L. Xue, T. Belytschko, and J. Cao, "Mechanics of fracture in single point incremental forming," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 212, no. 7, pp. 1573-1590, 2012.

[4] K. a. Al-Ghamdi and G. Hussain, "Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 88, pp. 82-94, 2015.

[5] M. J. Mirnia and M. Shamsari, "Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 244, pp.17-*43*, 2017.

[6] A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, and M. R. Morovvati, "Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals," *Journal of Modares Mechanical Engineering*, (In Persian), vol. 14, no. 14, pp. 1-8, 2015.

[7] S. Gatea, H. Ou, B. Lu, and G. *McCartney*, "Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model," *Journal of Engineering Fracture Mechanics,* vol. 186, pp. 59-79, 2017.

[8] C. F. Guzmán, S. Yuan, L. Duchêne, E. I. Saavedra Flores, and A. M. Habraken, "Damage prediction in single point incremental *forming* using an extended Gurson model," *International Journal of Solids and Structures,* vol. 151, pp.

45-56, 2018.

[9] A. Kumar, A. Kumar Singh, A. Shrivastava, S. Mishra, and K. Narasimhan, "Shear modified Lemaitre damage model for fracture *prediction* during incremental sheet forming," *International Journal of Solids and Structures,* vol. 252, pp. 111822, 2022.

[10] W. Peng and H. Ou, "Deformation mechanisms *and* fracture in tension under cyclic bending plus compression, single point and double-sided incremental sheet forming processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 184, p. 103980, 2023.

[11] D. Mohr and S. J. Marcadet, "Micromechanically-motivated phenomenological Hosford–Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities," *International Journal of Solids and Structures,* vol. 67-68, pp. 40-55, 2015.

[12] S. Basak and S. K. Panda, "Failure strains of anisotropic thin sheet metals: Experimental evaluation and theoretical prediction," *International Journal of Mechanical Sciences,* vol. 151, pp. 356-374, 2019.

[13] A. Zahedi, B. Mollaei Dariani, and M. J. Mirnia, "Experimental determination and numerical *prediction* of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model," *International Journal of Mechanical Sciences,* vol. 153-154, pp. 341-358, 2019.

[14] Z. Cheng *et al.*, "Forming limit analysis of AA5052 sheet under bilinear strain path by designing a novel large-scale gripping fixture," *Journal of Materials Research and Technology,* vol. 22, pp. 2425-2439, 2023.